

## 気温分布の遠隔計測のための回転ラマン 散乱方式レーザレーダの開発

山本 貴史\* 平等 拓範\* 小林 喬郎\*

### Development of a Rotational Raman Laser Radar for Remote Atmospheric Temperature Profiling

Takanobu YAMAMOTO, Takunori TAIRA, and Takao KOBAYASHI

(Received Feb. 26, 1993)

For measuring atmospheric temperature profiles in the lower troposphere, a rotational Raman Laser Radar (lidar) was developed. For high sensitive rotational Raman scattering measurements, the double grating polychromator was designed and a high Mie rejection ratio over  $3 \times 10^6$  was obtained with a high overall transmittance of 39%. Using a second harmonic beam of the Nd:YAG laser, random error of the temperature measurement due to signal-to-noise ratio was reduced to  $\pm 0.5$  K at a height of 1 km. Comparisons were made with radiosonde profile data and the result showed good agreement. Various systematic errors were analyzed and reduced by careful system analysis.

#### 1. まえがき

最近、環境破壊が進みその保全に関する科学技術が重要となってきた。とくに地球上の大気の状態を詳細に知ることが重要となり、なかでも気象三要素の1つである大気温度を実時間で三次元的に遠隔計測する技術の必要性が高まってきた。レーザレーダ（またはライダ:Lidar）は大気の三次元計測技術として有用性が示されてきた<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、大気温度計測のためのレーザレーダは未だ実用化されておらず、とくに大気の変動が激しくエアロゾル粒子の多い高度約1 km以下の低

---

\* 電子工学科

層対流圏での高精度な計測には成功していない。レーザーレーダによる気温計測法として、レーリィ散乱法<sup>4)</sup>、高分解スペクトル法<sup>5)</sup>、差分吸収法(DIAL)<sup>6)</sup>、振動ラマン散乱法<sup>7)</sup>、回転ラマン散乱法<sup>8),9)</sup>などが提案されている。とくに、回転ラマン散乱法は大気透過率の影響を受けず、光源も比較的簡単化できるなどの利点を持ち、現在のところ低層対流圏において最も高精度な計測が可能な方式と期待されている。

我々は、これまで光源にNd:YAGレーザの第二高調波(波長532 nm)を用いた回転ラマン散乱方式レーザーレーダの開発を行ってきた<sup>10),11)</sup>。前回の報告<sup>10)</sup>で回転ラマンレーザレーダシステムの中で最も重要となる分光技術として、2組の狭帯域干渉フィルタを用いた高分解能分光フィルタを開発し、室内実験の結果について報告した。しかしながらこの分光フィルタは迷光遮断率と効率に関して問題点が残されていた。そこで、本報告では2枚の回折格子を用いた高効率で、迷光遮断率の大きい二重回折格子型分光器の開発及びそれを用いたレーザーレーダによる気温測定の実験を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 測定原理

波長 $\lambda_0$ の単色光レーザパルスが大気へ送出したとき、波長 $\lambda_J$ 、回転量子数Jの回転ラマン散乱による受信電力 $P_r(\lambda_J, R)$ は、次式のラマンレーザレーダ方程式により示される。

$$P_r(\lambda_J, R) = P_0 \cdot \frac{1}{2} N(R) \left\{ \frac{d\sigma_J(T)}{d\Omega} \right\} A_r K_J Y(R) T_t(\lambda_0) T_t(\lambda_J) / R^2 \quad (1)$$

ここで、 $N(R)$ は距離 $R$ における大気分子密度、 $d\sigma_J(T)/d\Omega$ は温度 $T$ における分子の回転ラマン微分散断面積で回転ラマン散乱の強度を表す量であり、温度依存性を示す。 $K_J$ は光学系の全効率、 $Y(R)$ は受信視野による受信効率、 $T_t(\lambda_0)$ は送信波長の大気透過率、 $T_t(\lambda_J)$ は回転ラマン散乱波長の透過率である。また、実際に検出される回転ラマン散乱の受信電流は、

$$I(\lambda_J, R) = \frac{P_r(\lambda_J, R) e \eta(\lambda_J) \lambda_J G}{hc} \quad (2)$$

で表される。ここで、 $e$ は電子の電荷、 $\eta(\lambda_J)$ は検出器の量子効率、 $G$ はその電流増倍率、 $h$ はプランク定数、 $c$ は光速である。

回転ラマン散乱法は送信波長が単一波長で、温度係数の異なる2波長 $\lambda_J$ 、 $\lambda_{J'}$ の回転ラマン散乱による受信出力の比 $S(t, R)$ は、

$$S(T, R) = \frac{I(\lambda_J, R)}{I(\lambda_{J'}, R)} = \frac{\eta(\lambda_J) (d\sigma_J(T)/d\Omega) K_J Y(R) T_t(\lambda_J, R)}{\eta(\lambda_{J'}) (d\sigma_{J'}(T)/d\Omega) K_{J'} Y'(R) T_t(\lambda_{J'}, R)} \quad (3)$$

となり、(1)、(2)式での両波長での送信系の同一項は消去できる。また、2つのラマン散乱の波長差を2 nm ~ 3 nm程度に近接に選ぶことにより2波長での大気透過率が等しく、また $Y(R)$ 、 $\eta(\lambda_J)$ も等しいと仮定すると(3)式は次式のようになる。

$$S(T, R) = \frac{(d\sigma_J(T)/d\Omega) K_J}{(d\sigma_{J'}(T)/d\Omega) K_{J'}} \quad (4)$$

$K_J$ 、 $K_{J'}$ は使用する集光鏡と分光器の値を用いることにより一定値と仮定できるので、レーザーレーダの受信出力比から回転ラマン散乱強度比 $(d\sigma_J(T)/d\Omega) / (d\sigma_{J'}(T)/d\Omega)$ が測定でき、この値より距離 $R$ における気温 $T(R)$ の絶対値が

$$T(R) = -\alpha / \ln \{ S(R) / \beta \} \quad (5)$$

より求めることができる。ここで、 $\alpha$ は強度比の温度係数、 $\beta$ は定数である。また、基準高度  $R_0$ での気温  $T(R_0)$ に対する相対温度分布を求めるためには、

$$T(R) = T(R_0) + (S(T, R) - S(T, R_0)) / \alpha \quad (6)$$

より高度  $R$ での気温分布  $T(R)$ を求めることができる。(4)式からも分るように回転ラマン散乱方式では大気透過率の影響が少ないため、大気変動の激しい対流圏の気温分布計測に有効である。

また、温度の測定分解能 $\Delta T$ は、受信信号のバラツキが信号対雑音比( $S/N$ )で決定されるものと仮定すると、

$$\Delta T = \sqrt{2} [(S/N) \cdot \alpha]^{-1} \quad (7)$$

と与えられる。測定する2つの回転ラマンスペクトルを $S(4)$ 線と $S(12)$ 線に選んだとき、 $\alpha$ の計算値は $\alpha = -6.67 \times 10^{-3}$ であるから、 $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ を得るためには回転ラマン散乱受信電力の $\langle S/N \rangle$ は210と極めて大きな値が必要である。すなわち、この条件と大気の変動や遠隔条件も考慮して、本測定法の技術的難易度が高いことが分る。

### 3. 二重回折格子型分光器の設計、試作

#### 3. 1 設計条件

以下に本方式レーザレーダ用の分光器として必要な設計条件を挙げる。

(1) 高分解能特性：前論文<sup>10)</sup>より大気の $N_2$ 及び $O_2$ 分子の回転ラマン散乱スペクトルは非常に近接して分布しているため、その中から $N_2$ 分子の $S(4)$ 線と $S(12)$ 線のみを選択し、分離するためには波長幅 $\Delta \lambda = 0.4 \text{ nm}$ 以下の特性が必要である。

(2) 高効率特性：回転ラマン散乱断面積は約  $1 \times 10^{-34} \text{ m}^2/\text{str}$ と非常に小さいため高透過率の分光素子が必要である。

(3) 高遮断率特性：大気分子によるレーリィ散乱の断面積 $\sigma_{Ray}$ は回転ラマン散乱の断面積 $\sigma_{Rot}$ より約 400 ~ 500倍大きく、エアロゾルによるミー散乱断面積 $\sigma_{Mie}$ はそれよりもさらに約 2桁大きい。これらは全てレーザ光波長の散乱光であり、 $N_2$ 分子の回転ラマン散乱光より約 4 ~ 5桁も大きな光が迷光として入ってくる。測定分解能  $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ を得るのに必要な迷光遮断率 $\gamma$ は、 $K_1 = \sigma_{Ray} / \sigma_{Rot} \approx 5 \times 10^2$ 、 $K_2 = \sigma_{Mie} / \sigma_{Ray} \approx 10^1 \sim 10^2$ を用いて

$$\gamma = K_1 \cdot K_2 \cdot (S/N) \approx 1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \quad (8)$$

となる。すなわち、測定分解能 $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ を得るにはレーザ光に  $1.27 \text{ nm}$ と近接した $S(4)$ 線に対し、レーザ波長の散乱光を6 ~ 7桁以上遮断する極めて高い迷光遮断率が必要である。

(4) 低背景光雑音特性：大気温度の全日測定を行うためには、受信視野を極力狭くし、背景光雑音の低減を行うことが必要である。

(5) 軽量性：レーザレーダに利用するため小型、軽量であること、等が必要とされる。

前回報告した干渉フィルタを用いた高分解能フィルタは、効率が $S(12)$ チャンネルで6.1%で、迷光遮断率が $S(4)$ チャンネルで $2 \times 10^5$ であり、上記の設計条件を十分には満足していなかった。そこで、今回新たに高効率、高迷光遮断率特性を持つ二重回折格子型分光器の設計及び試作を行った。

### 3. 2 二重回折格子型分光器の基本特性

図1に設計、試作した二重回折格子型分光器の構成を示す。使用した回折格子はSpectrogon社の寸法50mm x 50mmの斜入射ホログラフィックS-008-405/1125型で格子定数 2400 本/mm、ブレイズ波長530 nmのものである。回折格子型分光器の特長として、干渉フィルタなどを用いた分光フィルタよりも効率が高く、測定波長の選択が比較的自由にできる点があげられる。したがって、アンチストークス光の測定や振動ラマン散乱光との同時測定などが可能となった。

入射開口の径は遮断率特性を考慮しスペクトル分解能を向上するため、400  $\mu\text{m}$ に設定した。開口を通った光は焦点距離200 mmのアクロマティックレンズによりコリメートされ、1段目の回折格子に入射され、焦点距離100 mmのアクロマティックレンズで集光され、幅300  $\mu\text{m}$ 、間隔400  $\mu\text{m}$ の2つのスリットによりS(4)線とS(12)線だけが透過され、2段目の回折格子でさらに励起光の波長の迷光成分と分離され、光ファイバに入射する。

光ファイバに入射する光のスポットはレンズの収差のために大きくなっているため、光ファイバはコア径の大きなものを用いるのが望ましいが、分解能と遮断率が低下するため、980  $\mu\text{m}$ の光ファイバの前に幅400  $\mu\text{m}$ 高さ1 mmのスリットを設置し、損失を少なくした。2本の光ファイバを通った回転ラマン散乱光は、2個の光電子増倍管(PMT)に入射され検出される。1段目の回折格子で反射された振動ラマン散乱光はブロッキングフィルタで600 nm以下の光が遮断されレンズで集光されて直接 PMTに入射される。また、中間スリットで散乱したミー散乱光はコア径980  $\mu\text{m}$ の光ファイバで受光し、PMTで検出される。

図2にこの分光器に波長532 nmのレーザ光を入射したときの2段目回折格子による焦点面上での総合的な迷光遮断率特性の測定結果を示す。横軸は光ファイバ上のレーザ波長に対応する焦点位置からの距離及び波長である。すなわち、迷光遮断率は S(4)線で  $3 \times 10^6$ 、S(12)線で  $3 \times 10^7$ 得られている。この値は濃い霧や雲が近距離にある時の測定には少し不足と思われるが、それ以外の天候での測定には十分な値である。また、波長534 nm付近で遮断率が低下しているのは、中間スリットで回り込んだ迷光成分に起因する。

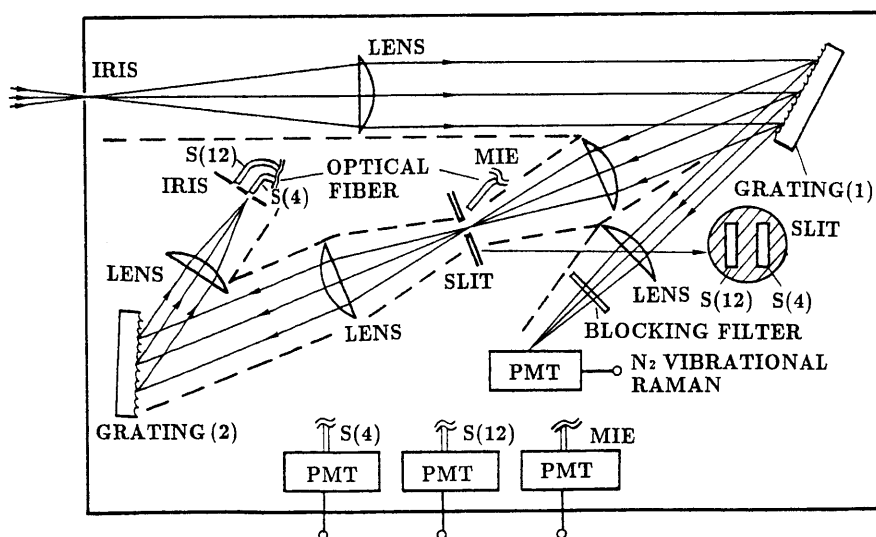


図1 二重回折格子型分光器の構成

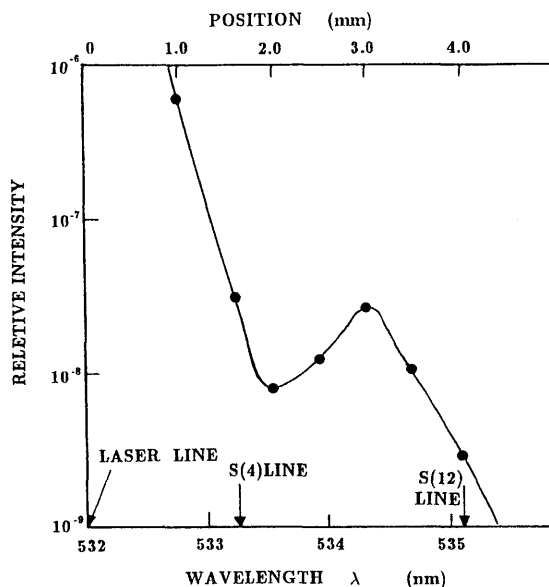


図2 迷光遮断率特性

表1に二重回折格子型分光器の総合特性を示す。回折格子の場合、波長差が数nmにおいては効率の差は微小でありS(4)線、S(12)線での効率も同じであると仮定できる。効率は39%と干渉フィルタを用いた分光フィルタに比べて約5倍の高効率であり、分解能は0.4 nmの値が得られた。さらに焦点距離の長いレンズを使用し回折格子を大型とすることにより、分解能及び迷光遮断率特性の向上が可能である。また、この分光器は大きさが60x35 cm、高さ12 cm、重さが3 kg程度であり、4チャンネル同時計測ができる二重回折格子型分光器として非常に小型、軽量なものであり、レーザレーダ等への応用に適していることが分る。

表1 二重回折格子型分光器の総合特性

ラマン線	波長シフト * $\delta \lambda$ (nm) ( $\delta \nu$ (cm <sup>-1</sup> ))	迷光遮断率 $\gamma$	効率 T (%)	分解能 $\Delta \lambda$ (nm)
S(4)	1.27 (44)	$3 \times 10^6$	39	0.40
S(12)	3.11 (108)	$3 \times 10^7$	39	0.40
Vib.	75.3 (2331)	$> 1 \times 10^7$	50	1.08

\* レーザ波長  $\lambda_0 = 532.0$  nm

#### 4. 回転ラマン散乱レーザレーダによる気温分布の計測実験

##### 4. 1 装置構成

図3に回転ラマン散乱レーザレーダシステムの装置構成を示す。光源としてSpectra-Physics社の

DCR-1A型放電管パルス励起QスイッチNd:YAGレーザを用いた。レーザ光はKD\*P結晶により直接Nd:YAGレーザの第2高調波(波長 $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ )が取り出され、繰り返し10Hz、最大エネルギー100 mJで大気中に送出される。大気からの後方散乱光は、ニュートン型反射望遠鏡により集光され、二重回折格子型分光器に導かれる。分光器では回転ラマン散乱の2波長と振動ラマン散乱波長及びミー散乱波長を分光し、4個のPMTで検出する。ラマン散乱信号は2台のトランジェントレコーダに入力し、GP-IBインターフェイスを介してコンピュータに転送され、高精度の信号処理を行い、空間分布を表示する。ミー散乱信号はシンクロスコープに入力し、常に大気状態や送受信系視野の重なりをモニタするために用いられる。光検出法としては光子計数法よりもダイナミックレンジの広いDC法(A-D変換法)を採用した。

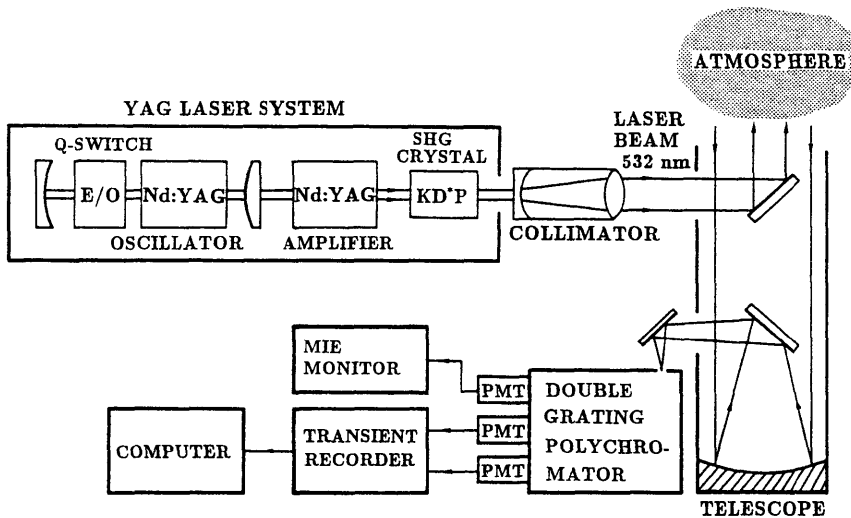


図3 回転ラマン散乱レーザレーダシステムの装置構成

#### 4. 2 システムの基本動作特性

図4に回転ラマンレーザレーダによる測定結果の例を示す。測定時間は27分(積算パルス数  $m = 16,384$ )である。(a)は視野の重なりを1000 m付近に合わせた場合のS(4)線とS(12)線の受信信号強度で、高度の2乗に比例して減衰するので  $R^2$  補正して表示してある。また、2波長の信号強度比も重ねて示してある。(b)は気温の高度分布で、絶対温度は地表温度を基準に(6)式より導出した。500 mより上層では、2つのプロファイルに相関がみられるが、300mより低層では受信効率が悪いので大きく変化している。SN比による測定分解能は高度1000 mで  $\Delta T = \pm 0.5^\circ \text{C}$  が得られた。

次に、バルーンによる気温の高度分布との比較測定を行った。使用したバルーンは、重さ100 gの、直径約2 mのゴム製の球形状で、ヘリウムガスを充填し、上昇速度が約300 m/分である。これに気温と気圧の測定器と発振器を取り付け、その上昇過程での気温と気圧のデータから高度を計算して気温の高度分布を得るものである。

比較測定の結果を図5に示す。レーザレーダの気温データは(6)式での基準強度比  $S(T, R_0)$  として

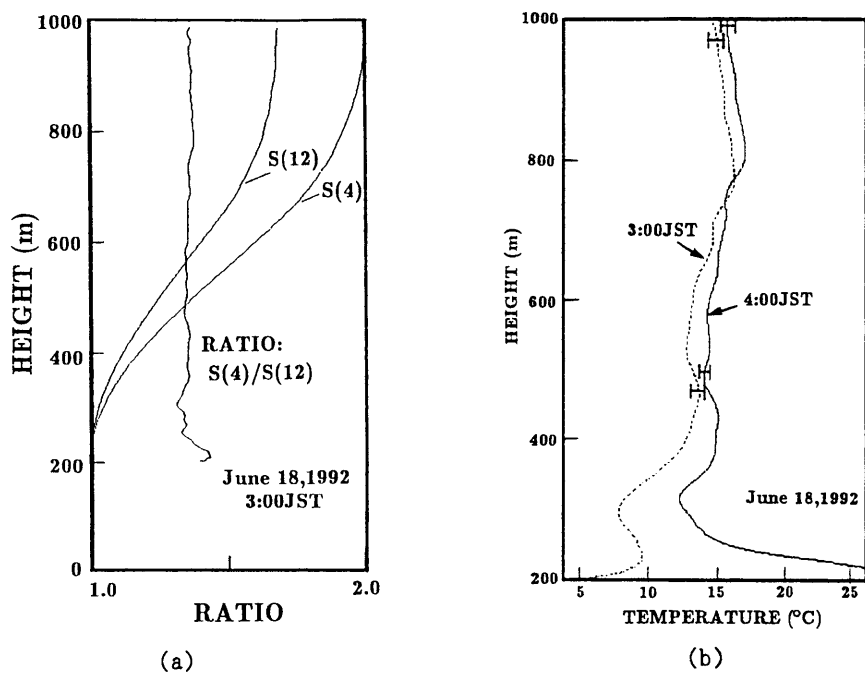


図4 気温の高度分布の測定結果の例

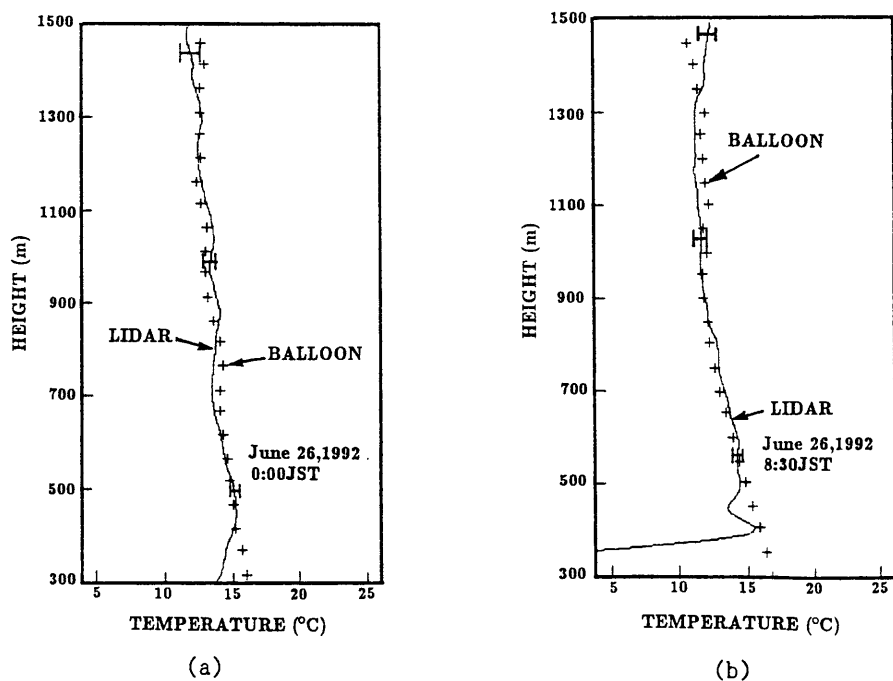


図5 バルーンとの気温高度分布の比較

高度400 mのバルーンデータを用いて導出している。この結果より、高度分布形状がほぼ一致していることが分る。しかしながら、(a)と(b)ではレーザレーダでの気温の絶対値が約10 °C 変動しており、この段階では誤差が大きいことが判明した。

#### 4. 4 システムの測定誤差とその改善

次に、上記のレーザレーダの測定の誤差の原因を究明し、改善法を検討した。測定誤差の原因を分類した結果を表2に示す。原因として最も大きく温度測定誤差に影響するのは、受信効率比の変動 $\Delta \{Y(R)/Y'(R)\}$ であり、これはレーザビーム出射角度の変動による分光器入射開口上でのスポット位置の変動により、分光器内の入射角が変化し、光ファイバに入射する中心波長と光量が両チャンネル間で微小に異なり、電圧比が変化するものである。0.1 mradの角度変動に対し $\Delta T = 7^\circ \text{C}$ の変動が生ずる。このレーザビーム出射角の変動の原因としては、光学系の熱的歪みやレーザの不安定動作が考えられる。

この誤差は受信光を光ファイバに入射させ、光の角度をスクランブルさせて分光器に入射することにより取り除くことができるが、最適なF値の光ファイバが見当たらず、また光ファイバで偏光方向がランダムになるため、回折格子の効率が低下することが問題点である。

表2 測定誤差の要因

測定誤差	原因	温度誤差 $\Delta T$
受信効率比の変動 $\Delta \{Y(R)/Y'(R)\}$	・レーザビーム出射角の変動 (分光器の中心波長の変動)	$7.0^\circ \text{C}/(0.1\text{mrad})$
大気透過率比の変動 $\Delta \{T_t(\lambda_j)/T_t(\lambda_{j'})\}$	・エアロゾルの種類、量	$1.5^\circ \text{C}/(1\%)$
エアロゾルの蛍光の混入	・エアロゾルの種類、量	$1.5^\circ \text{C}/(1\%)$
分光感度比の変動 $\Delta \{\eta(\lambda_j)/\eta(\lambda_{j'})\}$	・PMT光電面位置による感度の不均一さ ・PMT感度の非線形性	$1.5^\circ \text{C}/(1\%)$
測定分解能 $\Delta \{P_r(\lambda_j, R)/P_r(\lambda_{j'}, R)\}$	・受信信号のバラツキ(S/N) $\Delta T = \sqrt{2} [(S/N) \cdot \alpha]^{-1}$	$1.0^\circ \text{C}/(S/N=210)$ 高度 1000 m

この誤差の改善法として、レーザビームの出射ミラーを2個の電磁石により微動し、レーザビーム出射角の変動を補正することを試みた。電磁石にDC電圧を印加し、その電圧を変えることによりミラーの角度を2次元的に変化させた。計測時には常にミー散乱信号をモニターし、信号にY(R)値の変動が現れたとき角度を変えてこれを補正することを試みた。

このレーザビーム角度を補正して行った気温の高度分布の測定結果を図6に示す。計測は比較的溫度変化の少ない夜間の5時間にわたって行い、1データの測定時間は27分である。また、矢印はその時刻での地表温度である。絶対温度の決定は、時刻 20:00のデータをまず地表温度で決まる標準大気モデルに近いものと仮定してシステムの温度係数を求め、その他のデータに適用したものである。この結果より時間的に安定な測定ができており、絶対温度の測定が $\Delta T = 1^\circ \text{C}$ で可能であ



ることが示された。

さらに、表2に示した測定誤差の原因と考えられる大気透過率比の変動や、エアロゾルの蛍光の混入及び検出器の感度比の変動などについても今後詳細な検討が必要である。

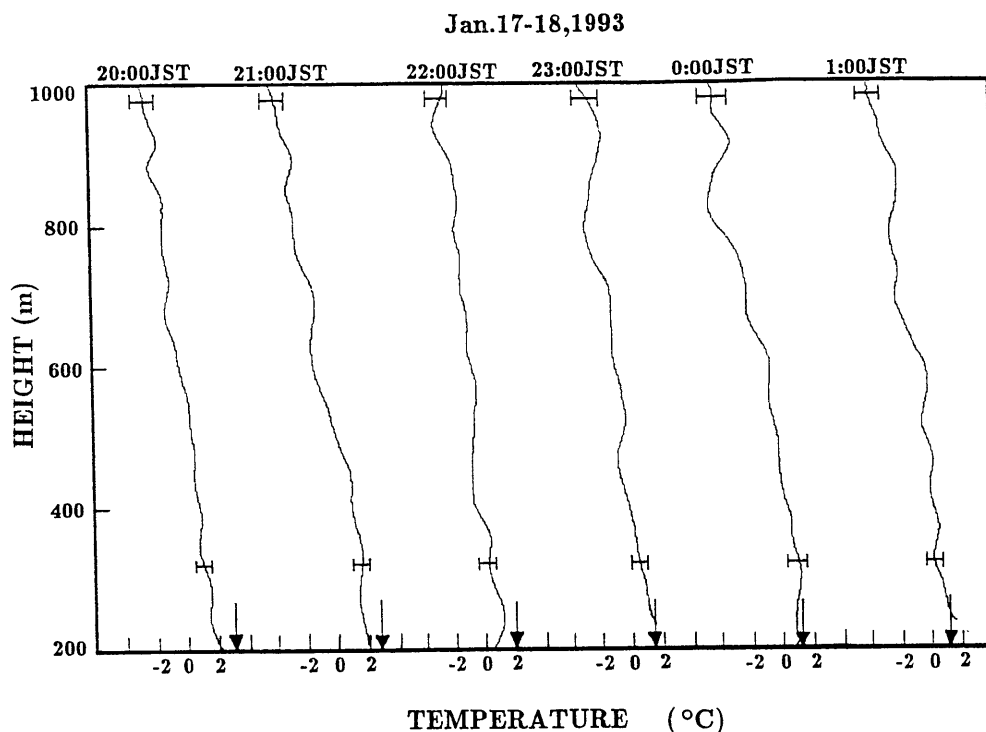


図6 レーザ角度補正後の気温の高度分布の測定結果

## 5. むすび

以上、Nd:YAGレーザの第二高調波を光源とした大気温度計測用回転ラマン散乱方式レーザレーダのための二重回折格子型分光器の試作、及びそれを用いて大気温度の高度分布の測定実験を行った。まず、二重回折格子型分光器の設計、試作、基本特性の測定を行い、高効率、高迷光遮断率が得られていることを確かめた。次に大気温度の高度分布の測定実験を行い、高度1000 mでS/N比による測定分解能 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ が得られ、バルーンとの高度分布の比較測定では良く一致した結果が得られた。絶対温度の測定では、大きな測定誤差の発生が問題となったが、レーザビーム射出角を補正することを試みた結果、ほぼ $1^{\circ}\text{C}$ 以内の変動に抑えることができた。今後はこの測定誤差に関する詳細な検討を行い、高精度な絶対温度の測定を可能にしたい。

<参考文献>

- 1) 小林喬郎 : "環境情報のレーザーリモートセンシング技術", 日本リモートセンシング学会誌, 5, 1, (1985)
- 2) H. Inaba and T. Kobayashi: "Laser-Raman Radar", Opt. Electron, 4, 101, (1972)
- 3) E.D. Hinkley: "Laser Monitoring of Atmosphere", Appl. Opt., 14, 228, (1983)
- 4) T. Shimizu, M. Kobuchi, and M. Maeda: "Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeF lidar", Appl. Opt., 25, 685-689, (1986)
- 5) H. Shimizu, K. Noguchi, and C.Y. She: "Atmospheric temperature measurement by a high spectral resolution lidar", Appl. Opt., 25, 1460-1466, (1986)
- 6) C.L. Korb and C.Y. Weng: "A Theoretical Study Of a Two-Wavelength Lidar Technique for the Measurement of Atmospheric Temperature Profiles", J. Appl. Met., 21, 1346-1355, (1982)
- 7) R.G. Strauch, V.E. Derr, and R.E. Cupp: "Atmospheric Temperature Measurement Using Raman Backscatter", 10, 2665-2669, (1971)
- 8) T. Kobayashi, H. Shimizu, and H. Inaba: "Laser radar techniques for remote measurement of atmospheric temperature", Abstracts of 6th ILRC., 49-50, Sendai, (1974)
- 9) Y.F. Arshinov, S.M. Bobrovnikov, V.E. Zuev, and V.M. Mitev: "Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar", Appl. Opt., 22, 2984-2990, (1983)
- 10) 平等, 佐々木, 山本, 小林, 堀, 北田: "大気温度計測用回転ラマン散乱ライダーのための高分解能分光器の開発", 福井大工報, 40, 1, 99-107, (1992)
- 11) T. Kobayashi, T. Taira, T. Yamamoto, A. Hori, and T. Kitada: "Rotational Raman Lidar for Lower Tropospheric Temperature Profiling", Abstracts of 16th ILRC., 205-208, Boston, (1992)